

## СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 626:8:624.131.6

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ВОДОПРОНИЦАЕМОСТИ КАПИЛЛЯРНОЙ КАЙМЫ ГРУНТА

Докт. техн. наук, проф. МИХНЕВИЧ Э. И., канд. техн. наук ЖИБУРТОВИЧ К. К.

Белорусский национальный технический университет,  
Белорусский государственный аграрный технический университет

Для полной количественной оценки расчетного потока грунтовых вод на мелиорируемых землях обычно используемых фильтрационных характеристик (коэффициента фильтрации грунта  $K_f$ , м/сут., и коэффициента водопроводимости  $T$ , м<sup>2</sup>/сут.) недостаточно. Необходимо также располагать величиной горизонтальной водопроницаемости капиллярной каймы грунта.

Расчет коэффициента фильтрации средне- и мелкозернистых песков, минеральных грунтов легкого механического состава можно производить по формуле [1]

$$K_f = [(67,5d_{10}^2 + 15,88d_{10}) - (0,049U^2 - 0,533U) - 0,76d_{10}U - 1,324]^2, \quad (1)$$

а крупнозернистых и гравелистых песков

$$K_f = 400d_{10} - 0,32U - 1,33d_{10}U - 47,40, \quad (2)$$

где  $d_{10}$  – диаметр частиц, меньше которых в грунте содержится 10 % по массе, мм;  $U = d_{60}/d_{10}$  – коэффициент неоднородности грунта;  $d_{60}$  – диаметр частиц, меньше которых в грунте содержится 60 % по массе, мм.

Коэффициент водопроводимости грунтов определим по формуле

$$T = K_f H, \quad (3)$$

где  $H$  – мощность водоносного горизонта, м.

Коэффициент фильтрации, коэффициент водопроницаемости капиллярной каймы и коэффициент водопроводимости определяют водопроницаемость грунтов и дают ее полную количественную характеристику.

Водопроницаемость капиллярной зоны значительно меньше водопроницаемости зоны пол-

ного насыщения. Для ее определения необходимо знать распределение влажности в капиллярной зоне (рис. 1).

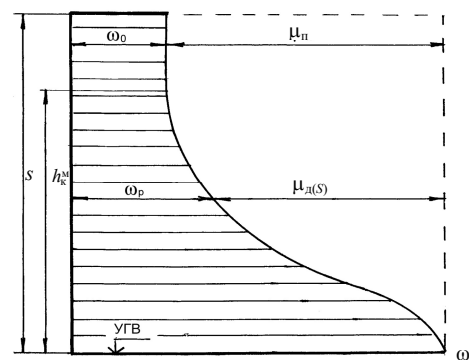


Рис. 1. Эпюра равновесного влагосодержания

Для капиллярной каймы, в которой капиллярный поток направлен горизонтально и параллельно основному потоку грунтовых вод, эпюра распределения влажности аналогична эпюре влажности при капиллярном насыщении, описываемой зависимостью, идентичной ранее полученной формуле [2] с заменой расстояния от УГВ до расчетной точки  $S$  на текущую ординату капиллярной каймы  $h$ :

$$W_{(h)} = W_n - (W_n - W_0) \left\{ 1 - \frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{h - S_{cp}}{\sigma\sqrt{2}}\right)}{2 - \operatorname{erfc}\left(\frac{S_{cp}}{\sigma\sqrt{2}}\right)} \right\}, \quad (4)$$

где  $W_{(h)}$  – влажность грунта на высоте  $h$  над УГВ, дол. ед.;  $W_n$  – полная влагоемкость грунта, дол. ед.;  $W_0$  – наименьшая влагоемкость грунта, дол. ед.;  $h$  – текущая ордината капиллярной каймы ( $h \leq h_k^m$ ), м;  $h_k^m$  – величина мак-

симального капиллярного поднятия в грунте, м;  
 $S_{cp}$ ,  $\sigma$  – параметры, характеризующие структуру  
 порового пространства грунта, м;

$$\operatorname{erfc}(Z) = 1 - \operatorname{erf}(Z), \operatorname{erf}(Z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^Z e^{-z^2} dz - \text{функ-}$$

ция ошибок;

$$\operatorname{erfc}(-Z) = 2 - \operatorname{erfc}(Z); \quad Z = \frac{S_{cp}}{\sigma\sqrt{2}}.$$

Для расчета  $W_n$ ,  $W_0$ ,  $h_k^M$ ,  $S_{cp}$ ,  $\sigma$  легких мине-  
 ральных грунтов методами планирования экс-  
 перимента получены расчетные зависимости  
 в виде полинома второго порядка в функции  
 от их гранулометрического состава [3]:

$$\omega_n = 0,3166 - 0,002U - 0,253d_{10} -$$

$$- 0,108d_{10} + 3,6d_{10}^2; \quad (6)$$

$$\omega_0 = 0,3744 - 0,011U - 3,651d_{10} +$$

$$+ 0,075d_{10}U + 9,94d_{10}^2; \quad (7)$$

$$h_k^M = 1,622 - 6,80d_{10}; \quad (8)$$

$$S_{cp} = 0,694 - 2,01d_{10}; \quad (9)$$

$$\sigma = 0,680 - 3,35d_{10}. \quad (10)$$

Зависимости (6)–(10) применимы при  $0,01 \leq$   
 $d_{10} \leq 0,16$  и  $2 \leq U \leq 8$ .

Параметры  $\omega_n$ ,  $\omega_0$ ,  $S_{cp}$ ,  $\sigma$ ,  $h_k^M$  определяли  
 прямыми методами. Основная цель проведен-  
 ных опытов состояла в получении на основе  
 применения математических методов планиро-  
 вания и анализа эксперимента эмпирической  
 формулы для расчета коэффициента дифферен-  
 циальной (текущей) водоотдачи  $\mu_{d(S)}$  для грун-  
 тов легкого механического состава (рис. 1).

Следовало подобрать непрерывную и диф-  
 ференцируемую функцию, позволяющую при  
 минимальном числе параметров учесть особен-  
 ности изменения  $\mu_{d(S)}$  в зоне аэрации в зави-  
 симости от глубины стояния  $S$  уровня грунто-  
 вых вод.

Наряду с опытами, проведенными на высо-  
 ких колоннах и в полевых условиях, исследо-  
 вания проводились в капилляриметрах (метод  
 отсасывания влаги из насыщенного образца,  
 позволяющий непосредственно определять ве-  
 личину  $\mu_{d(S)}$ ). В опытах использовались образцы

как нарушенной, так и ненарушенной, естест-  
 венной, структуры грунтов. Согласно требова-  
 ниям, предъявляемым к планированию экспе-  
 римента, часть опытов выполняли с использо-  
 ванием песчаных смесей.

Исследуемые грунты доводили до полного  
 насыщения путем капиллярного подпитывания  
 снизу вверх. Объем вытекшей воды на каждой  
 ступени разрежения фиксировали с точностью  
 до 0,01 г взвешиванием на электронных весах.  
 Опыт заканчивался при вакуумметрическом  
 давлении порядка 20–25 кПа.

Параметр  $\omega_0$  определяли по остаточному  
 влагосодержанию, устанавливаемому после  
 свободного стекания гравитационной влаги  
 выше зоны капиллярной каймы в результате оп-  
 ределения  $\mu_n$  (предельного значения  $\mu_{d(S)}$ ), тер-  
 мостатно-весовым методом.

Значение  $\omega_n$  рассчитывали как сумму вели-  
 чин

$$\omega_n = \mu_n + \omega_0, \quad (11)$$

где  $S_{cp}$ ,  $\sigma$  – параметры кривой изменения нор-  
 мированного коэффициента дифференциальной  
 водоотдачи  $\phi$  в функции от глубины стояния  $S$   
 (уровня грунтовых вод).

Величину показателя

$$\phi = \frac{\mu_{d(S)}}{\mu_n} \quad (12)$$

определяли графоаналитическим методом на  
 вероятностном трафарете и численными мето-  
 дами.

Также была аппроксимирована кривая оста-  
 точного (равновесного) влагосодержания ис-  
 следованных грунтов и графоаналитически оп-  
 ределены значения  $h_k^M$ , а путем интегрирования  
 кривой равновесного влагосодержания рассчи-  
 тывали среднюю по высоте влажность в зоне  
 капиллярной каймы  $W_{(h)}^*$ .

По зависимости (4) запасы влаги  $W_{(h)}^*$  опре-  
 деляются как площадь между осью  $h$  и  $W$  соот-  
 ветственно в границах выделенного слоя. Ве-  
 личина площади получается интегрированием  
 выражения (4) или же послойным суммирова-  
 нием.

Влагозапасы  $W^*$  над уровнем грунтовой во-  
 ды равны

$$W^* = \frac{1}{h} \int_0^h W_{(h)} dh. \quad (13)$$

После интегрирования и необходимых преобразований получим

$$W_{(h)}^* = W_{\Pi} - (W_{\Pi} - W_0) \times \left\{ 1 - \frac{\operatorname{ierfc}\left(-\frac{h - S_{\text{cp}}}{\sigma\sqrt{2}}\right) - \operatorname{ierfc}\left(\frac{h - S_{\text{cp}}}{\sigma\sqrt{2}}\right)}{\frac{h}{\sigma\sqrt{2}} \left[ 2 - \operatorname{erfc}\left(\frac{S_{\text{cp}}}{\sigma\sqrt{2}}\right) \right]} \right\}. \quad (14)$$

Водопроницаемость капиллярной зоны  $K_{\text{вк}}$ , м/сут., составит [4]

$$K_{\text{вк}} = K_{\Phi} \left( \frac{W_{(h)}^* - W_0}{n - W_0} \right)^{3,5}. \quad (15)$$

Здесь  $n$  – пористость грунта, дол. ед.

По формуле (15) рассчитывается водопроницаемость как частично, так и полностью развитой капиллярной каймы.

Для полностью развитой капиллярной каймы на основе применения методов планирования и анализа многофакторного эксперимента получены расчетные зависимости в виде алгебраического полинома в функции от гранулометрического состава: характерного диаметра  $d_{10}$  и коэффициента неоднородности  $U$  грунта. В табл. 1 приведены матрица плана эксперимента и результаты промежуточных расчетов по определению коэффициентов уравнения регрессии для  $K_{\text{вк}}$ .

Для принятого плана эксперимента коэффициенты полинома второго порядка находили по формулам [5]:

$$b_0 = 0,5 \sum_{U=1}^N \sqrt[3,5]{K_{\text{вк}U}} + (-0,5) \sum_{U=1}^K \sum_{U=1}^N X_{UI}^2 \sqrt[3,5]{K_{\text{вк}U}}; \quad (16)$$

$$b_{ii} = (-0,5) \sum_{U=1}^N \sqrt[3,5]{K_{\text{вк}U}} + 0,667 \sum_{U=1}^N X_{UI}^2 \sqrt[3,5]{K_{\text{вк}U}} + 0,333 \sum_{U=1}^K \sum_{U=1}^N X_{UI}^2 \sqrt[3,5]{K_{\text{вк}U}}; \quad (17)$$

$$b_i = 0,333 \sum_{U=1}^N X_{UI} \sqrt[3,5]{K_{\text{вк}U}}; \quad (18)$$

$$b_{ij} = 1,333 \sum_{U=1}^N X_{UI} X_{Uj} \sqrt[3,5]{K_{\text{вк}U}}; \quad (19)$$

$$b_0 = 0,5 \cdot 5,875 - 0,5 \cdot (2,217 + 2,300) = 0,679;$$

$$b_{11} = -0,5 \cdot 5,875 + 0,667 \cdot 2,217 + 0,333 \cdot (2,217 + 2,300) = -0,0454;$$

$$b_{22} = -0,5 \cdot 5,875 + 0,667 \cdot 2,300 + 0,333 \cdot (2,217 + 2,300) = 0,101;$$

$$b_1 = 0,333 \cdot (-0,362) = -0,125;$$

$$b_2 = 0,333 \cdot (2,266) = 0,7546;$$

$$b_{12} = 1,333 \cdot (-0,158) = -0,2106.$$

С учетом всех коэффициентов уравнение регрессии в кодированных переменных принимает вид:

$$\sqrt[3,5]{K_{\text{вк}}} = 0,679 - 0,1205X_1 + 0,7546X_2 - 0,2106X_1X_2 - 0,0454X_1^2 + 0,101X_2^2. \quad (20)$$

Таблица 1

Данные к определению коэффициентов уравнения регрессии для  $K_{\text{вк}}$ 

№ П/П	$X_1$	$X_2$	$X_1X_2$	$X_1^2$	$X_2^2$	$-\sqrt[3,5]{K_{\text{вк}}}$	$X_1 \sqrt[3,5]{K_{\text{вк}}}$	$X_2 \sqrt[3,5]{K_{\text{вк}}}$	$X_1X_2 \sqrt[3,5]{K_{\text{вк}}}$	$X_1^2 \sqrt[3,5]{K_{\text{вк}}}$	$X_2^2 \sqrt[3,5]{K_{\text{вк}}}$
1	0,866	0,5	0,433	0,75	0,25	0,968	0,838	0,484	0,419	0,726	0,242
2	-0,866	0,5	-0,433	0,75	0,25	1,360	-1,178	0,680	-0,589	1,02	0,34
3	0	-1	0	0	1	0,072	0	-0,072	0	0	0,072
4	0	1	0	0	1	1,489	0	1,489	0	0	1,489
5	0,866	-0,5	-0,433	0,75	0,25	0,301	0,261	-0,151	-0,130	0,226	0,075
6	-0,866	-0,5	0,433	0,75	0,25	0,327	-0,283	-0,164	0,142	0,245	0,082
7	0	0	0	0	0	0,679	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0,679	0	0	0	0	0
					$\Sigma$	5,875	-0,362	2,266	-0,158	2,217	2,300

Статистическую значимость коэффициентов проверяли с помощью  $t$ -критерия Стьюдента при уровне значимости  $\alpha = 0,05$ . Критическое значение  $t_{кр}$  выбирали для числа степеней свободы  $N(r-1) = 16$  и  $P = 0,95$  [5].

С учетом статистически значимых коэффициентов уравнение регрессии в кодированных переменных приводится к виду

$$\sqrt[3]{K_{вк}} = 0,679 - 0,1205X_1 + 0,7546X_2 - 0,2106X_1X_2 + 0,101X_2^2. \quad (21)$$

После раскодирования переменных запишем уравнение регрессии следующим образом:

$$K_{вк} = [(10,1 d_{10}^2 + 8,83 d_{10}^2) + 0,037U + 0,7d_{10}U - 0,167]^{3,5}. \quad (22)$$

Значения  $K_{вк}$ , рассчитанные по зависимости (22), хорошо согласуются с опытными данными (табл. 2).

Таблица 2  
Опытные и расчетные значения  $K_{вк}$ , м/сут.

Значения $K_{вк}$	Номер опыта							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Опытные	0,89	2,93	0,0001	4,93	0,02	0,03	0,258	0,258
Расчетные	0,80	2,70	0,0001	4,99	0,028	0,036	0,258	0,258

Для определения  $K_{вк}$  крупнозернистых и гравелистых песчаных грунтов реализован полный факторный эксперимент (ПФЭ) типа  $2^K$  [6].

В качестве математической модели использовали полином первого порядка вида

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2. \quad (23)$$

С учетом статистически значимых коэффициентов уравнение регрессии запишем в кодированных переменных

$$K_{вк} = 4,612 - 0,540X_1 + 3,102X_2 + 0,310X_1X_2. \quad (24)$$

После раскодирования переменных уравнение приводится к виду

$$K_{вк} = 22,78d_{10} - 0,5U + 1,08d_{10}U - 0,5. \quad (25)$$

Зависимость (25) применима при  $0,16 \leq d_{10} \leq 0,5$  и  $2 \leq U \leq 8$ . Зависимости (22) и (25) адекватны при  $\alpha = 0,05$ .

Полученные расчетные зависимости могут быть использованы применительно к расчетам фильтрационных потерь из каналов (при установившейся свободной фильтрации) по формулам, учитывающим действие капиллярных сил, а также уровней грунтовых вод и объемов воды, подаваемых извне на мелиоративные системы, при подпочвенном увлажнении. Значения, полученные по разработанным математическим моделям, могут также входить составной частью в результаты, рассчитываемые по интерпретированному соответствующим образом формулам В. В. Ведерникова, Б. К. Ризенкампа, Н. Н. Веригина, А. Н. Костякова и других авторов, учитывающих капиллярную водопроницаемость и приведенный расход капиллярной каймы.

## ВЫВОД

Приведена методика расчета горизонтальной водопроницаемости капиллярной каймы легких минеральных грунтов в функции от их гранулометрического состава. Полученные расчетные зависимости обеспечивают достаточную для инженерных расчетов точность (погрешность – не более 10 %) и рекомендуются к применению в фильтрационных расчетах регулирующей сети гидромелиоративных систем для оптимизации водного режима на мелиорированных землях.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Жибуртович, К. К. Особенности применения коэффициента фильтрации в гидромелиоративных расчетах / К. К. Жибуртович // Мелиорация переувлажненных земель: труды БелНИИМиЛ. – 1999. – Т. XLVI. – С. 84–96.
2. Гулюк, Г. Г. Оценка влияния мелиоративных систем на сопредельные территории / Г. Г. Гулюк, К. К. Жибуртович // Вестник БГСХА. – Горки, 2004. – Вып. 4. – С. 73–77.
3. Жибуртович, К. К. Расчет наименьшей и полной влагоемкостей легких минеральных грунтов / К. К. Жибуртович // Управление водным режимом мелиорированных земель: сб. науч. работ БелНИИМиВХ. – Минск, 1987. – С. 117–123.
4. Аверьянов, С. Ф. Фильтрация из каналов и ее влияние на режим грунтовых вод / С. Ф. Аверьянов. – М.: Колос, 1982. – 238 с.
5. Таблицы планов эксперимента для факторных и полиномиальных моделей: справ. изд. / В. З. Бродский [и др.]. – М.: Наука, 1982. – 752 с.
6. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа / Ю. А. Евдокимов [и др.]. – М.: Наука, 1980. – 230 с.

Поступила 19.10.2010